

MAG 1:



Champ magnétique

Notions et contenu	Capacités exigibles
1. Champ magnétique	
Sources de champ magnétique ; cartes de champ magnétique.	<p>Exploiter une représentation graphique d'un champ vectoriel, identifier les zones de champ uniforme, de champ faible, et l'emplacement des sources.</p> <p>Identifier l'allure des cartes de champs magnétiques pour un aimant droit, une spire circulaire et une bobine longue.</p> <p>Décrire un dispositif permettant de réaliser un champ magnétique quasi uniforme.</p> <p>Citer des ordres de grandeur de champs magnétiques : au voisinage d'aimants, dans une machine électrique, dans un appareil d'IRM, dans le cas du champ magnétique terrestre.</p>
Lien entre le champ magnétique et l'intensité du courant.	Évaluer l'ordre de grandeur d'un champ magnétique à partir d'expressions fournies.
Moment magnétique.	<p>Définir le moment magnétique associé à une boucle de courant plane.</p> <p>Associer un moment magnétique à un aimant, par analogie avec une boucle de courant.</p> <p>Citer un ordre de grandeur du moment magnétique associé à un aimant usuel.</p>

I. INTRODUCTION

I-1. Rappel

Les champs magnétiques sont créés par des *aimants* ou par des *courants électriques*, c'est-à-dire par des charges en mouvement. Les très forts champs magnétiques sont créés par des *bobines supraconductrices*.

I-2. Notion de champ vectoriel

Le champ magnétique sera quant à lui décrit par un champ vectoriel $\vec{B}(r)$ défini en tout point de l'espace.

On a déjà rencontré d'autres champs vectoriels comme le champ gravitationnel, le champ électrique.

Le champ magnétique en un point sera caractérisé par sa norme (ou son intensité) mesurée en tesla (T) par sa direction et par son sens (on utilise la règle de la main droite ou du tire-bouchon).

Le champ magnétique est une grandeur vectorielle permettant de décrire les effets du courant électrique ou des matériaux magnétiques tels que les aimants.

Une façon simple de visualiser **sa direction** est de tracer les lignes de champ.

On oriente la ligne de champ dans le **sens** du vecteur \vec{B} .

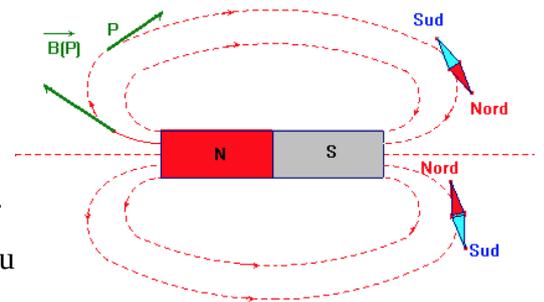
Deux lignes de champ ne peuvent pas se croiser, sauf pour $\vec{B} = \vec{0}$.

Une ligne de champ ne donne pas d'indication sur la norme du champ qui peut varier le long de la ligne.

Une ligne de champ magnétique est une ligne en tout point tangente au champ magnétique. On oriente la ligne de champ dans le sens du vecteur.

Deux lignes de champ ne peuvent pas se croiser, sauf si le vecteur est nul au point d'intersection.

- Les lignes de champ magnétique sont des courbes fermées qui entourent les sources.
- Elles sont dirigées du pôle nord vers le pôle sud.



I-3. Ordres de grandeur

Champ magnétique terrestre	$5 \cdot 10^{-5} \text{ T}$
Au voisinage d'un aimant	0,1 à 1 T
Fil parcouru par 1A, à 1cm de celui-ci	$2 \cdot 10^{-5} \text{ T}$
Au voisinage d'un électroaimant	1 à 10 T
Bobines supraconductrices	jusqu'à 45 T

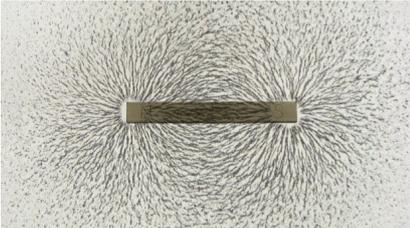
Dans le cerveau humain	10^{-15} T
IRM	1,5 T et 3 T

II. AIMANTS ET BOUSSOLES

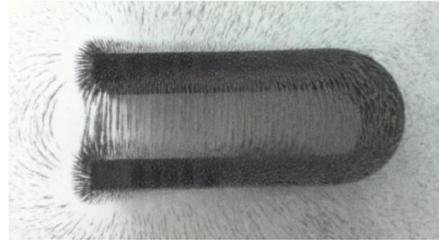
II-1. Cartographie du champ

On peut obtenir l'allure des lignes de champ en utilisant de la limaille de fer. En présence du champ magnétique, la limaille de fer s'aimante et tend à s'orienter dans le sens du champ.

aimant droit



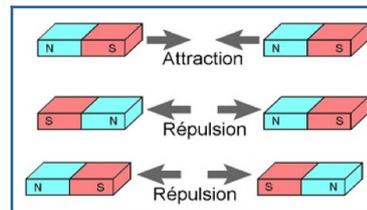
aimant en U



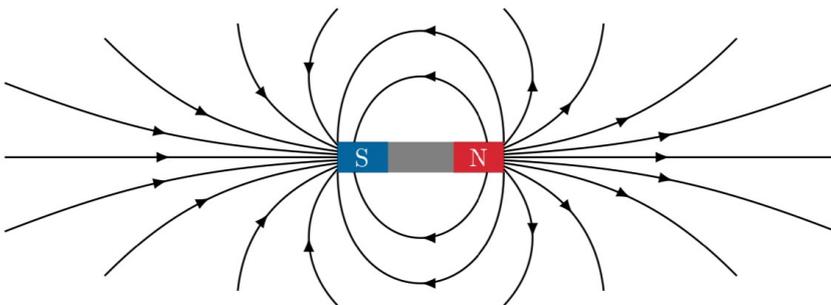
II-2. Pôles d'un aimant

Tout aimant possède un pôle nord et un pôle sud magnétique. Les interactions entre deux aimants obéissent à la loi suivante :

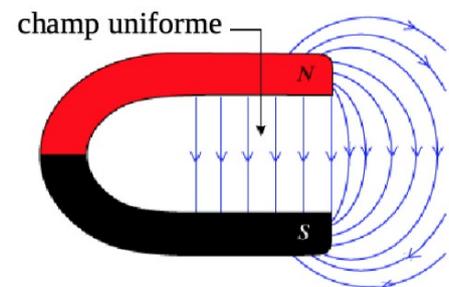
- deux pôles de même nature se repoussent
- deux pôles de nature distincte s'attirent



On appelle pôle nord, le pôle par lequel émergent les lignes de champ. Ces lignes sont ainsi orientées du pôle nord vers le pôle sud. Plus les lignes de champ sont rapprochées, plus le champ est intense. Les zones où le champ est le plus intense se trouvent au voisinage de la source du champ magnétique.



Champ créé par un aimant droit

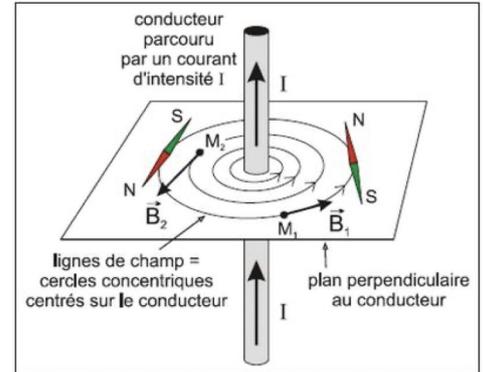
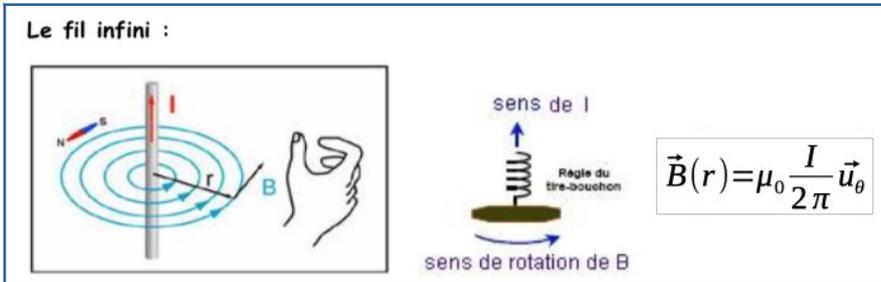


Champ créé par un aimant en U

III. CHAMP CREE PAR DES CIRCUITS

III-1. Fil infini

On considèrera un fil infini, si on se place à une distance r très petite devant sa longueur l . Vous établirez en deuxième année l'expression du champ magnétique créé par le fil en coordonnées cylindriques, avec μ_0 la perméabilité magnétique du vide. ($\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$).



La norme du champ magnétique produit est:

- proportionnelle à l'intensité du courant qui le crée;
- décroît au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la source (ici du fil).

On constate que les lignes de champ magnétiques autour d'un fil rectiligne sont circulaires, dans le plan perpendiculaire au fil. Les lignes de champ magnétiques s'enroulent autour du fil. Pour obtenir le sens on peut utiliser la règle du tire-bouchon ou la règle de la main droite.

Tire-Bouchon :

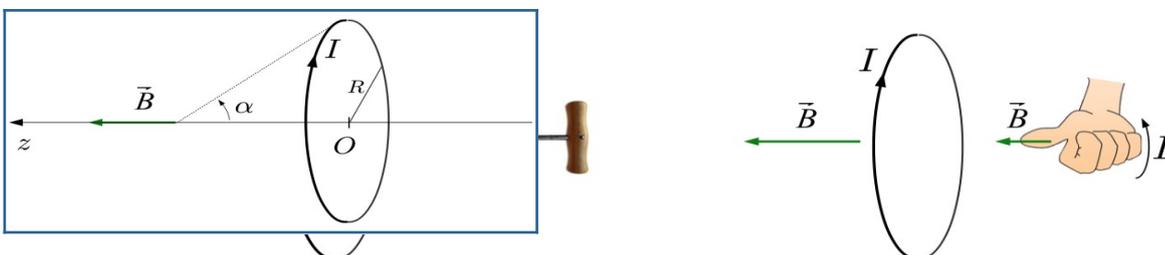
le sens de rotation permettant une avancée du tire-bouchon, dans le sens de I , indique le sens d'enroulement de \vec{B} .

Main droite :

lorsque le pouce pointe dans le sens de I les autres doigts se replient dans le sens de \vec{B} .

III-2. Spire de courant

On constate que le sens du champ magnétique créé est en accord avec la règle tire-bouchon (ou de la main droite) vue précédemment.

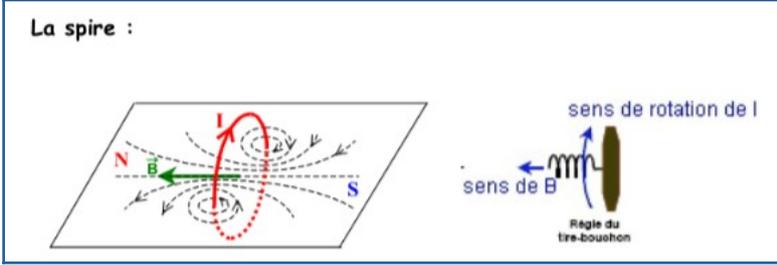
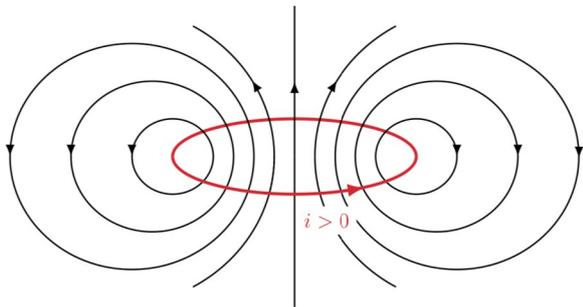


Dans le cas des circuits à enroulement circulaire il existe une seconde loi de la main droite utilisable: si les doigts s'enroulent dans le sens de I alors le pouce pointe dans le sens de \vec{B} . De manière équivalente, si on tourne le tire-bouchon dans le sens du courant il avance dans le sens de \vec{B} :

On peut établir l'expression du champ sur l'axe Oz :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2R} \sin^3 \alpha \vec{u}_z = \frac{\mu_0 I}{2R} \frac{R^3}{(R^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \vec{u}_z$$

La norme du champ magnétique au centre de la spire vaut $B(0) = \mu_0 I / (2R)$

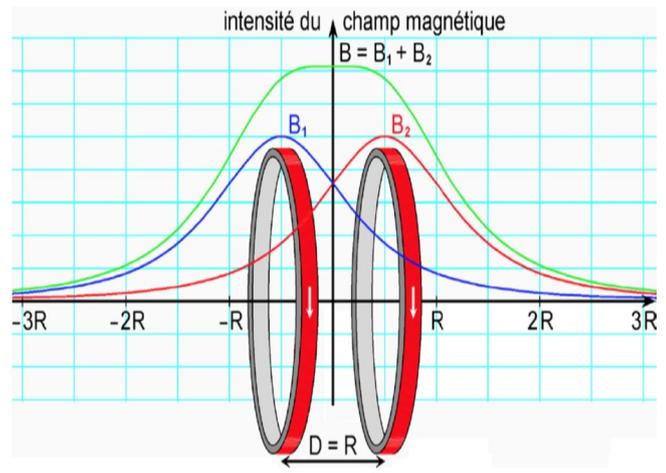
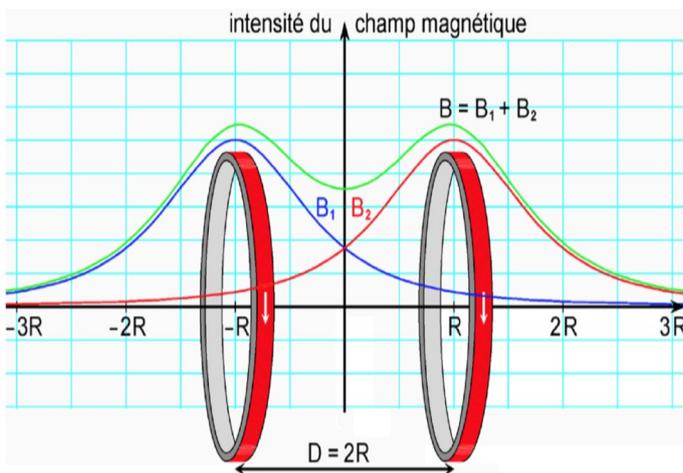


III-3. Utilisation de deux spires pour obtenir un champ uniforme

Ainsi, si on considère deux spires (1) et (2) créant respectivement les champs magnétiques $\vec{B}_1(r)$ et $\vec{B}_2(r)$, le champ résultant créé par les deux bobines vaudra

$$\vec{B}(r) = \vec{B}_1(r) + \vec{B}_2(r)$$

On s'intéresse au champ créé par deux bobines identiques de même axe.



En modifiant la distance D qui sépare les centres des deux bobines, on montre que lorsque $D = R$, l'intensité B du champ magnétique résultant est pratiquement uniforme dans une zone délimitées par le cylindre formé par les deux bobines.

La configuration où les deux bobines sont distantes de R est appelé configuration de Helmholtz. On parle alors de "bobines de Helmholtz". L'étude expérimentale du champ magnétique créé par les bobines de Helmholtz montre que dans une région voisine du centre de symétrie du système

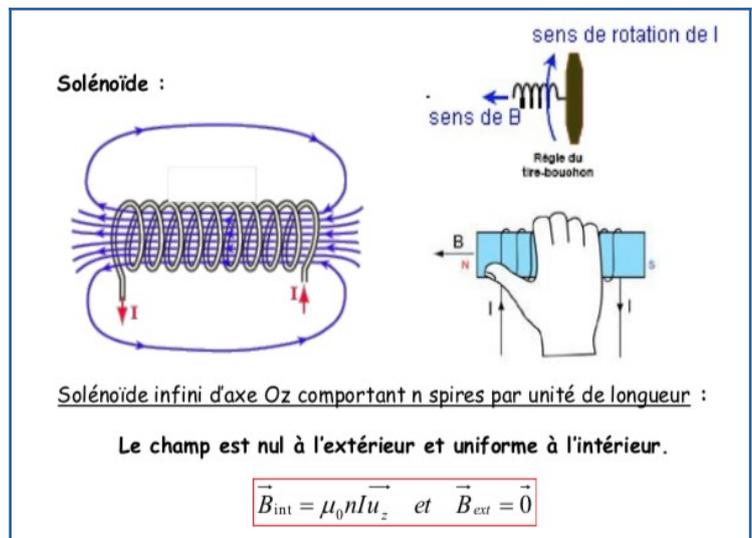
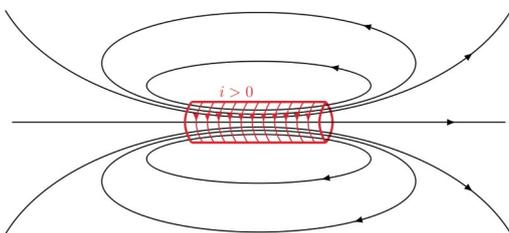
le champ magnétique est : $B = 0,72 \mu_0 N \frac{I}{R}$. Il est uniforme, dirigé suivant l'axe commun des bobines, de sens donné par la règle de la main droite. Les bobines de Helmholtz constituent un dispositif intéressant pour réaliser un champ magnétique uniforme.

III-4. Solénoïde

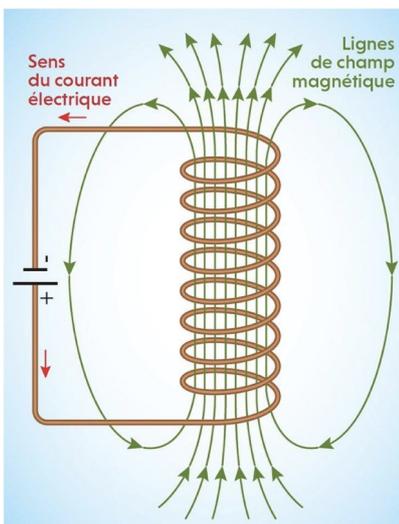
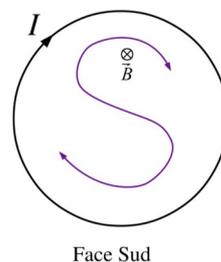
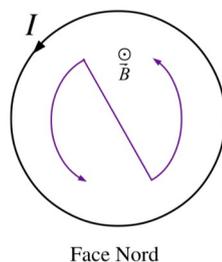
Un solénoïde est constitué d'un enroulement de fil conducteur sur un profil cylindrique. Il est assimilable à la juxtaposition de N spires parcourues par un courant I . Si on note L la longueur totale du solénoïde, on définit $n = \frac{N}{L}$ nombre de spires par unité de longueur.

Si on note R le rayon d'une spire, plus $L \gg R$, plus le champ est uniforme à l'intérieur du solénoïde. À la limite du solénoïde infini, on obtient un champ uniforme à l'intérieur du solénoïde et parallèle à l'axe Oz .

L'orientation de \vec{B} se déduit de celle de I par la règle du tire bouchon ou la règle de la main droite.



On peut, par analogie avec le champ créé par un aimant, attribuer des faces Nord et Sud à un solénoïde (ou à une spire). La face Nord correspond à la face par laquelle le champ magnétique émerge.



Les lignes de champ sont canalisées à l'intérieur de la bobine, et s'écartent en sortie. Cela est associé à une diminution de la norme du champ.

Si on change le signe du courant, le champ magnétique change de sens.

Il y a une symétrie de révolution autour de la bobine.

Les courants tournent autour des lignes de champ, en suivant la règle de la main droite ou du tire-bouchon.

Les expressions mathématiques du champ magnétique en fonction de la forme des circuits électriques seront étudiées pour certains cas, en deuxième année.

On retiendra que, B est proportionnel à $\mu_0 \frac{I}{L}$ avec I le courant électrique responsable du champ magnétique, L une distance typique du problème et $\mu_0 \approx 4\pi \times 10^{-7}$ H/m la perméabilité magnétique du vide.

III-5.Champ magnétique uniforme

On rappelle que le champ magnétique est uniforme, autrement dit qu'il ne dépend pas de la position, si les lignes de champs sont parallèles. C'est le cas, entre autre, pour certaines zones de trois dispositifs (à retenir) :

- à l'intérieur d'un solénoïde
- entre les deux branches de l'aimant en U
- entre deux bobines de Helmholtz . Il s'agit simplement de deux bobines fines mises en regard l'une de l'autre avec le courant les parcourant dans le même sens . ($D = R$)

Si les lignes de champ sont parallèles entre elles et régulièrement espacées alors le champ est uniforme.

Pour disposer d'un champ magnétique uniforme on voit donc que l'on peut utiliser un solénoïde long («infini»), un aimant en U (entre les deux branches) ou des bobines de Helmholtz .

Dans un solénoïde long le champ magnétique est très uniforme loin des bords mais l'accès à ce champ est rendu délicat pour des expériences encombrantes.

Les bobines de Helmholtz permettent de réaliser des expériences plus volumineuses mais l'uniformité du champ est moins précise.

IV SYMETRIES ET INVARIANCES DU CHAMP MAGNETIQUE

Soit M un point de l'espace :

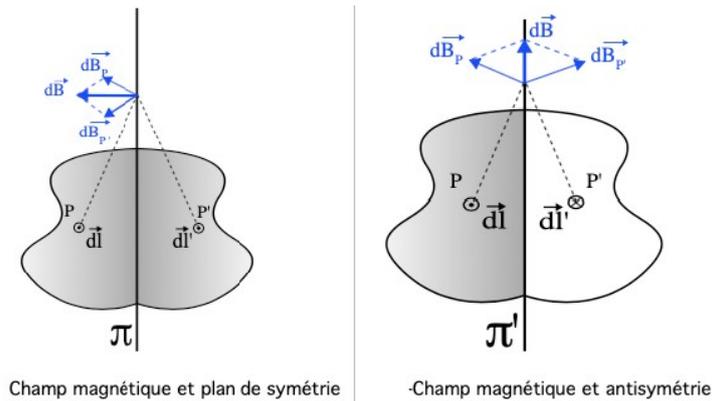
SYMETRIES

- si P est un plan de symétrie des courants passant par M alors le champ magnétique créé en M par le système de courants est orthogonal au plan P ;

- si P' est un plan d'antisymétrie des courants passant par M alors le champ magnétique créé en M par le système de courants est contenu dans le plan P' .

INVARIANCES

- Si le système de courants est invariant par rotation ou translation, alors le champ magnétique aura les mêmes invariances.



Application de l'invariance

Lorsqu'un observateur ne voit pas de changement dans la distribution de courant en se déplaçant dans la direction d'un axe x , on dit que la distribution de courant est invariante par translation selon x .

Conséquence pour le champ magnétique (en cartésiennes)

$$\vec{B}(M) = B_x(x, y, z)\vec{e}_x + B_y(x, y, z)\vec{e}_y + B_z(x, y, z)\vec{e}_z$$

Lorsqu'un observateur ne voit pas de changement dans la distribution de courant en effectuant une rotation d'angle θ autour d'un axe, on dit que la distribution de courant est invariante par rotation d'angle θ .

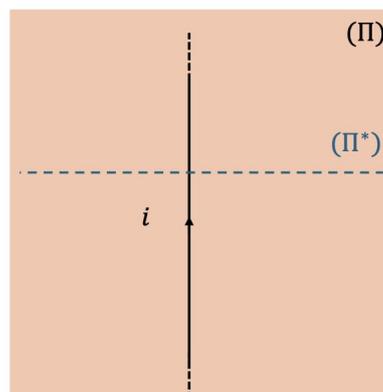
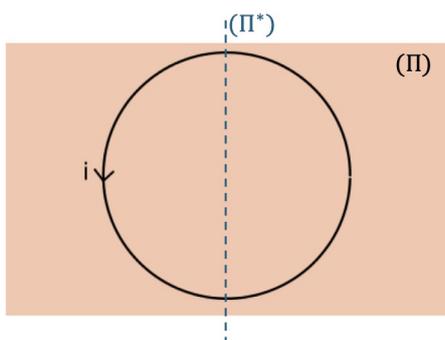
Conséquence pour le champ magnétique (en cylindriques)

$$\vec{B}(M) = B_r(r, \theta, z)\vec{e}_r + B_\theta(r, \theta, z)\vec{e}_\theta + B_z(r, \theta, z)\vec{e}_z$$

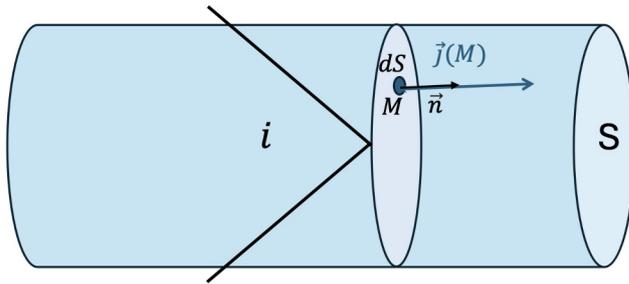
Application de la symétrie

Le plan (Π) est un plan de symétrie de la distribution de courant si pour tout couple de points (M, M') symétriques par rapport à (Π) , $\vec{j}(M')$ est le symétrique de $\vec{j}(M)$ par rapport à (Π) .

Le plan (Π^*) est un plan de symétrie de la distribution de courant si pour tout couple de points (M, M') symétriques par rapport à (Π^*) , $\vec{j}(M')$ est l'opposé du symétrique de $\vec{j}(M)$ par rapport à (Π) .



Rappel : le vecteur densité de courant $\vec{j}(M)$



$$\text{Cas général} \\ i = \iint_{M \in \text{section}} \vec{j}(M) \cdot \vec{dS}$$

$$\text{Cas uniforme et aligné} \\ i = jS$$

Méthode pour déterminer la direction de \vec{B}

- 1- Préciser le point M en lequel on recherche la direction du champ \vec{B} .
- 2- Si on trouve un plan de symétrie des courants qui passe par M alors \vec{B} est orthogonal à ce plan. Si on trouve un plan d'antisymétrie des courants qui passe par M alors \vec{B} appartient à ce plan.
- 3- Si on trouve deux plans de symétrie des courants (ou plus) qui passent par M alors la direction de \vec{B} est donnée par l'intersection de ces plans.

Méthode pour déterminer les coordonnées dont dépendent les composantes de \vec{B}

- 1- rechercher les invariances de la distribution des courants.
- 2- Préciser les coordonnées dont dépendent les composantes du champ.
 - invariance par rotation autour d'un axe (Oz): utiliser les coordonnées cylindriques (r, Θ, z) .

Les composantes du champ (et donc sa norme) ne dépendent pas de Θ .

- invariance par translation le long d'un axe: utiliser la coordonnées linéaire sur cet axe. Le champ ne dépend pas de cette coordonnée.

V. MOMENT MAGNETIQUE

V1- Moment magnétique d'une boucle de courant

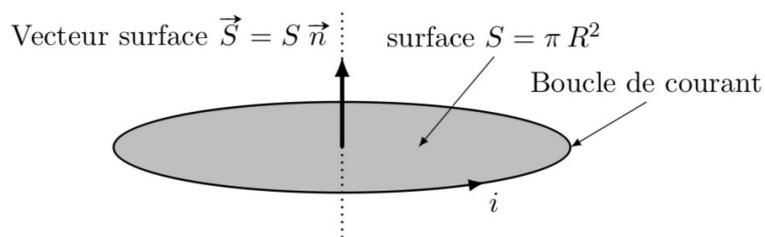
On considère une spire de rayon R parcourue par un courant i. Cette boucle forme une surface

S. La normale à la surface est notée \vec{n} . Il s'agit d'un vecteur unitaire, normal à la surface formée par la boucle de courant et orienté dans le sens de la main droite (défini à partir du sens du courant).

On définit le vecteur surface $\vec{S} = S\vec{n}$

Le moment magnétique \vec{M} de N spires planes (en A · m) est :

$$\vec{M} = N I S \vec{n} \quad \text{avec } S = \pi R^2$$



Le moment magnétique d'une boucle de courant.

V2- Moment magnétique associé à un aimant

Le courant i étant à l'origine du champ magnétique, on peut dire que le moment magnétique \vec{M} est à l'origine du champ magnétique. Ainsi lorsque l'on a un courant électrique, le lien entre intensité, moment magnétique et champ magnétique est facile à établir.

Dans un aimant droit par exemple, il n'est pas facile de mettre en évidence des boucles de courant. l'origine du champ magnétique dans la matière est quantique mais en première approche, il peut être associé à des boucles de courant microscopiques résultant du déplacement des électrons autour des atomes. Chaque boucle de courant microscopique crée un moment magnétique \vec{M}_i et le moment magnétique total \vec{M} est la somme vectorielle de tous les champs magnétiques \vec{M}_i . Dans la majorité des matériaux, les \vec{M}_i s'annulent deux à deux mais pour certains matériaux, ce n'est pas le cas et un moment magnétique non nul persiste donnant naissance à un champ magnétique \vec{M} .

Tous les matériaux magnétiques sont définis grâce à leur moment magnétique macroscopique \vec{M} .

Dans le cas des aimants, il est constant.

Similitudes entre les champs créés par un aimant et une bobine. Les deux sources de champs sont toutes deux équivalentes à un même moment magnétique orienté du pôle Sud vers le pôle Nord.



Considérons une spire de rayon a parcouru par un courant I . On remarque que le champ produit à grande distance de la spire est comparable à celui produit par un aimant. On parle de dipôle magnétique et on le caractérise par un vecteur appelé moment dipolaire magnétique et orienté Sud-Nord.

V3- Ordres de grandeur

Moment magnétique...	Ordre de grandeur
d'un aimant droit usuel	$1 \text{ A} \cdot \text{m}^2$
d'un petit aimant néodyme fer bore	$10 \text{ A} \cdot \text{m}^2$
de la Terre	$8 \times 10^{22} \text{ A} \cdot \text{m}^2$

POUR ALLER PLUS LOIN: notions sur l'origine des phénomènes magnétiques .

1. A l'échelle macroscopique

Les sources de **champ magnétique** comme les effets du champ semblent très variés. Dans toutes les expériences, on note la présence de particules chargées en mouvement. Les phénomènes magnétiques ont pour origine l'interaction de **charges en mouvement**.

Le **champ électrostatique** est lié à l'existence de **charges immobiles**, le champ magnétique est lié à l'existence de charges en mouvement, mais on sait que la notion de mouvement est directement dépendante de celle de référentiel. Suivant le référentiel dans lequel on se place, l'interaction entre charges est décrite par un champ électrique ou un champ magnétique : en fait \vec{E} et \vec{B} sont les deux aspects des interactions électromagnétiques.

2. A l'échelle atomique ou nucléaire

On montre en mécanique quantique lors de l'étude des particules élémentaires que chaque particule constitue un dipôle magnétique (un aimant élémentaire) lié à sa propriété de spin. On associe également un dipôle magnétique à certaines orbitales électroniques des atomes qui constituent alors un dipôle magnétique atomique. L'existence de ces dipôles élémentaires ou magnétons permet d'expliquer les différents types de propriétés magnétiques de la matière à l'échelle macroscopique.

a) Le ferromagnétisme :

Le ferromagnétisme est la propriété de certains corps de s'aimanter très fortement sous l'effet d'un champ magnétique extérieur (influence), et pour certains (les aimants) de garder une aimantation importante même après la disparition du champ extérieur (rémanence). Cette propriété macroscopique résulte de l'interaction des dipôles magnétiques atomiques entre eux dans le matériau, les "magnétons" étant orientés majoritairement de la même façon au sein de la substance. L'agitation thermique (au-dessus d'une certaine température) fait disparaître le phénomène. Pour l'usage industriel, seul le fer (Fe), le cobalt (Co) et le nickel (Ni) sont ferromagnétiques. Certaines terres rares (Lanthanides dans la classification périodique) sont également ferromagnétiques à basse température. Certains alliages de fer et de nickel ne sont pas ferromagnétiques alors que l'alliage d'Heussler, constitué de métaux non ferromagnétiques (61% Cu, 24% Mn, 15% Al), est ferromagnétique. Les ferrites, et en particulier, la magnétite Fe_3O_4 (FeO ; Fe_2O_3) sont des composés ferromagnétiques.

b) Le paramagnétisme :

Le paramagnétisme est la tendance des dipôles magnétiques atomiques à s'aligner avec un champ magnétique externe. Dans le cas du paramagnétisme, les moments dipolaires magnétiques sont sans interaction entre eux ; c'est ce qui fait que les effets du paramagnétisme, à l'échelle macroscopique, sont moins spectaculaires que dans le cas du ferromagnétisme.

Les éléments paramagnétiques sont : l'aluminium Al (métal), le baryum Ba (métal alcalino-terreux), le calcium Ca (métal alcalino-terreux), l'oxygène liquide O_2 (non métal), le platine Pt (métal de transition), le sodium Na (métal alcalin), le strontium Sr (métal alcalino-terreux), l'uranium U (métal (actinide)), le magnésium Mg (métal alcalino-terreux), le technétium Tc (métal de transition artificiel), le lithium Li (métal alcalin).

c) Le diamagnétisme :

Lorsqu'on introduit de la matière en un lieu où règne un champ magnétique, ce dernier agit sur l'ensemble du mouvement électronique par un phénomène d'induction magnétique. Cela produit un dipôle magnétique induit qui est proportionnel au champ appliqué et qui s'oppose à ce dernier. La diminution du champ magnétique provoqué par ce phénomène est très faible : l'effet relatif de l'ordre de 10^{-5} (sauf pour les supraconducteurs). Le diamagnétisme apparaît dans tous les matériaux mais il est masqué par les effets du paramagnétisme ou du ferromagnétisme lorsque ceux-ci coexistent. Certains corps placés dans un état supraconducteur (basse température) sont dit

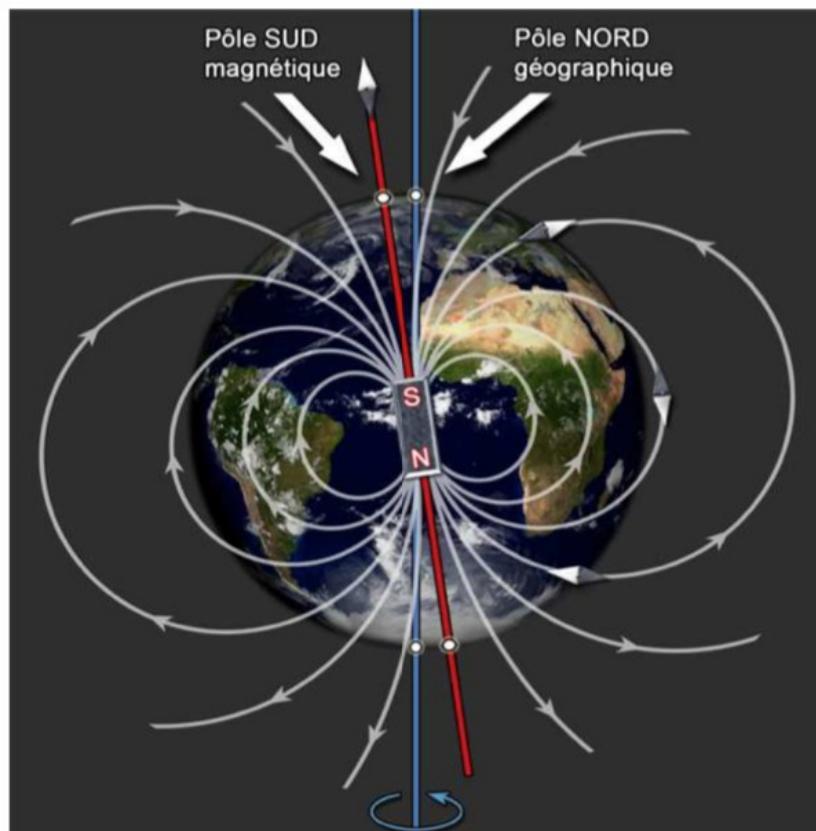
diamagnétiques parfaits car toute variation de champ magnétique entraîne en leur sein des courants induits qui ne sont pas amortis du fait de l'absence de résistance. Ces courants induits créent un champ magnétique induit qui compense exactement la variation du champ magnétique extérieur. Cette propriété est utilisée pour réaliser la lévitation magnétique des supraconducteurs.

d) L'antiferromagnétisme :

C'est une forme de magnétisme dans lequel les dipôles magnétiques des atomes voisins s'organisent de façon anti-parallèle. Comme dans le cas du ferromagnétisme, il existe des matériaux qui en dessous d'une température critique manifestent un ordre magnétique. Ici, à cause de phénomènes quantiques, les atomes s'organisent de manière à former une alternance de dipôles magnétiques de sens opposés. Il en résulte que le matériau n'apparaît pas aimanté malgré l'ordre magnétique régnant en son sein. Louis Néel a reçu le prix Nobel (en 1970) pour ses travaux sur l'antiferromagnétisme.

Et la Terre

Les lignes de champs vont du pôle Nord vers le pôle Sud et les boussoles s'orientent le long des lignes de champs. Cela est compatible avec la situation de la Terre, car les pôles magnétiques et géographiques sont inversés.



PLAN

I. INTRODUCTION

I-1. Rappel

I-2. Notion de champ vectoriel

I-3. Ordres de grandeur

II. AIMANTS ET BOUSSOLES

II-1. Cartographie du champ

II-2. Pôles d'un aimant

III. CHAMP CREE PAR DES CIRCUITS

III-1. Fil infini

III-2. Spire de courant

III-3. Utilisation de deux spires pour obtenir un champ uniforme

III-4. Solénoïde

III-5. Champ magnétique uniforme

IV SYMETRIES ET INVARIANCES DU CHAMP MAGNETIQUE

V. MOMENT MAGNETIQUE

V1- Moment magnétique d'une boucle de courant

V2- Moment magnétique associé à un aimant

POUR ALLER PLUS LOIN: notions sur l'origine des phénomènes magnétiques .

VIDEOS

Les aimants. Est-ce quantique? <https://youtu.be/iO9H8DMXtMU>